



TITLE:

An optimum structural design methodology
for acoustic metamaterials using topology
optimization(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Noguchi, Yuki

CITATION:

Noguchi, Yuki. An optimum structural design methodology for acoustic metamaterials
using topology optimization. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21754>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	野 口 悠 暉
論文題目	An optimum structural design methodology for acoustic metamaterials using topology optimization （トポロジー最適化を用いた音響メタマテリアルの最適構造設計法）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文では、自然界に存在する均質材の持たない特異な音響特性を示す人工材料である音響メタマテリアルの構造創成設計を目的として、音響構造連成系において所望の性能を示す音響メタマテリアルや、メタマテリアルの所望の分散関係を実現するための、トポロジー最適化を用いた最適構造設計法の構築に関する研究について論じている。本学位論文は5章からなっており、各章の内容は以下の通りである。</p> <p>第1章では、本論文の背景と目的について述べている。さらに、トポロジー最適化法について概観している。とくに、本研究で用いるレベルセット法に基づくトポロジー最適化の定式化について説明するとともに、設計感度であるトポロジー導関数の概念と、その導出方法についてまとめている。</p> <p>第2章では、音響構造連成問題に対して有効なトポロジー最適化法を提案している。音響構造連成系は、音響材料と弾性体材料から成る系であり、音響材料中の音波と弾性体材料中の弾性波が材料界面において相互作用を示す。通常の音響構造連成解析では、弾性体と音響材料の界面で連成境界条件を課す必要がある。しかしながら、トポロジー最適化の過程ではこれらの界面が移動、もしくは新たに生成される可能性があるため、通常の解析方法に基づくトポロジー最適化では、その数値実装が煩雑となる問題がある。そこで本章では、弾性体相と音響材料相の2相からなる混合材料を想定した音響構造連成モデル（2相材料モデル）を提唱し、このモデルとトポロジー最適化法を組み合わせた、連成境界条件の実装が不要な最適設計手法を構築している。そして、数値例として提案手法を音圧最小化問題に適用し、物理的に妥当な最適構造が得られることを確認しており、本提案手法の妥当性と有効性を検証している。</p> <p>第3章では、第2章で提案したトポロジー最適化法を、音響メタマテリアル設計問題に展開している。負の体積弾性率を示す音響メタマテリアルは、メタマテリアルを構成する最小単位であるユニットセルに誘起される局所共振現象に基づき、音波の透過を許容しない周波数帯を有することが知られており、防音デバイスとしての応用が期待されている。これまでに、弾性波の影響を無視し音響場のみを考慮するという近似に基づき、音響メタマテリアルの最適設計を行った例が報告されているが、本来音響メタマテリアルは音響構造連成系であるため、得られた設計案に基づくメタマテリアルが所望の性能を実際に示す保証はない。そこで本章では、音響構造連成系において負の体積弾性率を示すメタマテリアルの構造最適設計を行う手法を提案している。すなわち、有限の厚みを有する音響メタマテリアルを設計対象とし、Sパラメータによって表現されたメタマテリアルの有効体積弾性率を目的関数とする最適化問題を定式化するとともに、2相材料モデルによって表現された音響構造連成問題に対して厳密な設計感度であるトポロジー導関数を導出している。そして、これらを用いた最適化アルゴリズムを構築している。数値例として2次元設計問題に適用し、提案手法の有効性を検証している。最適化計算によって得られた構造は、対象とする周波数において入射音波に対して局所共振現象に基づき膨張を示すことから、音響構造連成系において負の体積弾性率を有することが確認され、提案手法の有効性を示している。</p> <p>第4章では、所望の分散関係を示す音響メタマテリアルの最適設計を目的としたトポロジー最適</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	野 口 悠 暉
<p>化法を構築している。音響メタマテリアルの持つ分散関係は、メタマテリアル内を伝搬する音波の巨視的な波動伝搬特性を表す。近年では、分散関係に基づきメタマテリアル内部で異方的な波動伝搬特性を示す異方性メタマテリアルが注目を集めており、回折限界を超えたイメージングが可能な音響ハイパーレンズ等の革新的な音響デバイスへの応用が期待されている。このような音響デバイスを設計するためには、メタマテリアルの持つ音響特性を適切に評価する必要がある。近年提唱された高周波均質化法は、従来の均質化法の適用が難しい波動伝搬問題に対して有効な均質化法であり、共振状態を内包するメタマテリアルの性能評価が可能な解析手法である。本章では、高周波均質化法をトポロジー最適化法と統合化した新しい最適設計手法を構築しており、音響メタマテリアルの分散特性の設計を目的としている。まず、メタマテリアルの巨視的な特性を表す均質化方程式の振る舞いを記述するテンソルの成分を用いた目的関数を設定し、所望の分散関係を実現するための最適化問題を定式化するとともに、設計感度であるトポロジー導関数を導出し、それを用いた最適化アルゴリズムを構築している。さらに、数値例により双曲型の分散関係を持つ音響メタマテリアルのユニットセル構造の最適化が可能であることを示し、提案手法の有効性を検証している。</p> <p>第5章では、本論文の結論を述べており、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、音響メタマテリアルの構造創成設計を目的として、音響構造連成系において所望の性能を示す音響メタマテリアルや、メタマテリアルの所望の分散関係を実現するための、トポロジー最適化を用いた最適構造設計法の構築に関する研究についてまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 音響構造連成問題に対して有効なトポロジー最適化法を構築した。すなわち、弾性体相と音響材料相の2相からなる混合材料を想定した音響構造連成モデル(2相材料モデル)を提唱し、このモデルとトポロジー最適化法を組み合わせ、連成境界条件の実装が不要な最適設計手法を構築した。数値例として提案手法を音圧最小化問題に適用し、物理的に妥当な最適構造が得られることを確認しており、本提案手法の妥当性と有効性を示した。
2. 上記のトポロジー最適化法を音響メタマテリアル設計問題に展開し、音響構造連成系において負の体積弾性率を示すメタマテリアルの構造最適設計を行う手法を構築した。Sパラメータによって表現されたメタマテリアルの有効体積弾性率を目的関数とする最適化問題を定式化するとともに、2相材料モデルによって表現された音響構造連成問題に対して厳密な設計感度であるトポロジー導関数を導出し、それを用いた最適化アルゴリズムを構築した。さらに、数値例により音響構造連成系において負の体積弾性率を示す音響メタマテリアルの設計が可能であることを示し、提案手法の有効性を検証した。
3. 所望の分散関係を示す音響メタマテリアルの最適設計を目的とした、高周波均質化法とトポロジー最適化法を統合化した最適設計手法を構築した。メタマテリアルの巨視的な特性を表す均質化方程式の振る舞いを記述するテンソルの成分を用いた目的関数を設定し、所望の分散関係を実現するための最適化問題を定式化するとともに、設計感度であるトポロジー導関数を導出し、それを用いた最適化アルゴリズムを構築した。さらに、数値例により双曲型の分散関係を持つ音響メタマテリアルのユニットセル構造の最適化が可能であることを示し、提案手法の有効性を検証した。

以上により本論文は、音響メタマテリアル構造創成設計問題を対象としたトポロジー最適設計法の構築を行い、数値例により提案手法の有効性を示しており、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。